

用热扭实验法评价工具钢使用性能的研究

An Exploration of the Feasibility on Evaluating
Performances of Tool Steels in Terms of Deformation
Work by the Method of Hot Torsion

张德一
Zhang Deyi

吕立华
LuLihua

刘荣运
Liu Rongyun

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 630044)

(重庆特钢所)

摘要 论述了一种与刃具使用时受力状态相似的衡量工具钢使用性能的实验方法——热扭转法。其特点是用热扭转时之弹性变形功, 弹塑性变形功来衡量和评价工具钢的使用性能。

关键词 热扭转法; 工具钢; 弹性变形; 塑性变形; 弹塑性变形 / 弹塑性变形功; 热扭分析

中国图书资料分类法分类号 TG115.5; TG711

ABSTRACT At present, the extensively-used methods of test are not capable of evaluating deformances of tool steels accurately and comprehensively. Thus, searching for a method of test which is conducted in a pressurized state similar to that of the cutting tools in use is of great importance. Hot torsion is simple in experimental set-up and controllable in test temperature and velocity, hot torsion specimen and the cutting tools being equally under shearing action. In terms of elastic deformation work and elastic-plastic work, the performance of a tool steel can be evaluated in a manner superior to that in terms of shear strength (τ) and shear strain (γ) of the material, regarding the reliability and accuracy of the test.

KEYWORDS method of hot torsion; tool steels; elastic deformation; plastic deformation / elastic-plastic deformation work; hot torsion analysis

0 引 言

随着现代科学技术发展工业水平的提高,机械工业的加工产品不仅要求尺寸精度高,表面光洁度好,而且还要求加工工具的使用寿命长,提高生产率,因此正确地估价评定工具材料使用性能的试验方法就显得非常重要。目前评定工具钢材料使用性能的试验方法很多,如常规机械性能试验(常温硬度、高温硬度、高温拉伸等)、红硬性试验,日本金属公司提出的抗崩刃试验、刃具直接车削试验等。所有这些试验都只能在一定角度内局部地反映工具钢的使

用性能,但都不能较全面地,准确地衡量工具钢的使用性能,为此找出一种能与工具受载条件,磨损破坏过程相近似的试验方法来衡量工具钢的使用性能具有很大的现实意义。

1 试验方法的理论基础

圆柱形杆件在纯扭转时,圆柱体表面上与圆柱轴线相垂直的方向是最大剪应力作用方向,与轴线成 45° 方向是最大主应力方向(图 1)^[1]。因此扭转时试样表面上与轴线相垂直的方向是纯剪应力作用方向,根据断口型式亦可判断。以车削为例^[2]如图 2。切削时刀具承受主切削力 F_c (切向力),进给抗力 F_x ,切深抗力 F_z 的联合作用。

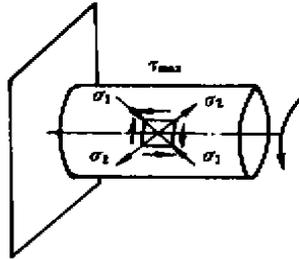


图 1 扭转时杆件表面应力图示

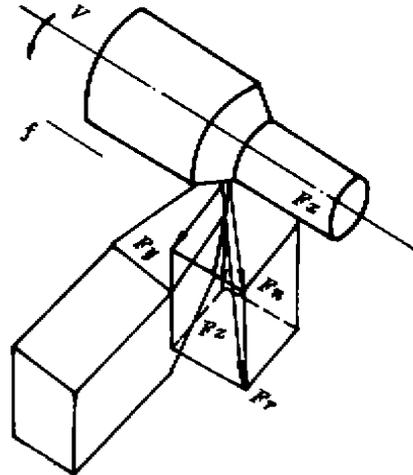


图 2 切削时刀具受力图示

轴向车削时 F_c 最大,其次为 F_x ,它们是计算车刀强度的基础,它们对刀具产生扭矩,使工具内部产生剪切应力,刀具加工时,刀具与工件之间相互摩擦产生温升,接触区温度可超过 700°C ,二者综合作用使工具内部之剪应力值达到或超过材料之剪切强度极限(τ_s)时,工具便断裂了。

研究工作中发现用于测定钢热塑性之热扭转法^[5],可以在选定的试验温度 T 、扭转速度 V 的条件下,扭转变形只受纯剪切力作用,当试验表面剪应力达到材料的强度极限时就产生裂纹或断裂,这些都与切削工具受载时产生之应力状态及断裂形式基本一致,因此热扭转变形能够模拟工具高温,高应力状态下之剪变形和断裂过程,试样断裂后可立即保护断口进行电镜分析,观察断口形式,碳化物大小和分布、形态等。通过大量试验证实该法可以对工具钢的使用性能进行综合评价,从而提出一种用于评价工具钢使用性能的新方法——工具钢使用性能的热扭分析法。

2 试验方法及结果

2.1 试样准备

将不同高速钢(M2A1,301)加工成扭转试样,其工作带直径为 6 mm,工作带长度 $L = 50$

mm. 然后将试样按工具钢使用条件进行热处理如表 1, 热处理后之试样工作带部分磨光到以上。

表 1 试样热处理规程

钢种	T_1	T_2	T_3	T_4
M2A1	850	1210	600 盐浴分级冷却	500 回火 3 次, 每次 1h
301	900	1240		

T_1 : 予热温度; T_2 : 盐浴面浴温度;
 T_3 : 冷却温度; T_4 : 回火温度。

试样钢的化学成份:

表 2 试样化学成分

钢材名称	C	W	Mo	Cr	V	Al	Mn	P.S
M2A1	1.10 ~ 1.20	5.50 ~ 7.00	4.50 ~ 5.50	3.80 ~ 4.40	1.80 ~ 2.20	1.00 ~ 1.20		
301	0.90 ~ 1.05	2.70 ~ 3.70	1.70 ~ 2.70	3.80 ~ 4.40	0.70 ~ 1.30	0.50 ~ 0.90	≤ 0.40	≤ 0.30

表 3 热扭时弹塑性变形曲线包络的面积

试验 钢种	$T/^\circ\text{C}$	τ_e KN/mm ²	γ_e	τ_{\max} kN/mm ²	γ_{\max}	扭转记录曲线包络面积			mm ²
						S_e	S_p	S	
M2A1	650	1165	0.04	1493	0.082	150	374	524	0.28
	625	1075	0.039	1557	0.137	138	893	1031	0.13
	600	1051	0.04	1494	0.101	144	584	727	0.20
301	650	1115	0.036	1519	0.072	135	339	474	0.29
	625	969	0.032	1449	0.099	102	557	620	0.16
	600	1056	0.037	1551	0.102	136	552	687	0.20

注: S_e : 扭转记录曲线上弹性变形区曲线包络的面积;
 $T/^\circ\text{C}$: 扭转试验温度;
 S_p : 扭转记录曲线上弹塑性变形区曲线包络的面积。
 $S = S_e + S_p$ 。

2.2 试验装置

试验是在笔者自己改装的热扭转试验机上进行的, 机上安装有 3 KW 硅碳棒管式电炉, 炉温由室温到 1250 $^\circ\text{C}$ 连续可调, 并用 DWK702 精密温度控制器自动控制在任一温度条件下进行热扭试验, 扭转速度为: 30、60、100、150 转/分, 用电阻应变仪和 X-Y 函数记录仪记录扭转变形时之力矩、轴向力及扭转圈数的变化, 即 $M = f(n)$ 关系曲线, 通过适当的数学力学变换可变成 $\tau = f(\gamma)$ 关系曲线, 对记录曲线经过数学整理后得到表 2 数据, 通过对断口观察分析和表 3 数据对比即可研究不同扭转温度、速度、不同热处理条件对工具钢使用性能的影响。

3 试验曲线分析

各种钢种在不同热扭转试验温度条件下记录曲线形式大体相似,只是不同材料或同一种材料热处理条件不同,在不同热扭转温度条件下记录曲线的弹性变形区及弹塑性变形区曲线斜率变化和曲线下所包络的面积大小不同而已。记录曲线形状如图 4。

M_s : 扭转比例极限时之扭转力矩(τ_s 剪切抗力); M_{max} : 最大扭断力矩(断裂瞬间之扭转力矩、最大剪切抗力 τ_{max}); γ_{max} : 最大扭转角(扭断瞬间扭转角); τ_s : 扭转比例极限时之扭转角。

记录曲线中,EF 段曲线是由于试样与夹具之间隙而产生的,曲线 EB 段属弹性变形区,扭转力矩与扭转角(扭转圈数)成线性关系,作曲线 EB 线的切线 AB 与曲线相交于 B 点, B 点在纵坐标轴之投影为扭转弹性极限力矩 M_s , 与横坐标相交于 A 点,过 B 点作横坐标的垂线相交与 C 点,由线段 AC 长度就可换算出扭转圈数(剪变形 γ), BC 段曲线表示材料已进入弹塑性变形区,扭转力矩与扭转变形间呈非线性关系,由 GD 线段可换算出扭断时之最大弹塑性变形。

如果在同一测试,记录条件下曲线 ABCD 与横坐标所围成的面积 S ,可看做从开始扭转变形到试样扭断前所需的总变形功 W ,其中面积 ABG (S_e) 看做弹性变形所需要的功 W_e ,面积 GBCD 看做弹塑性变形所需要的变形功 W_p ,根据各种材料在不同温度条件下扭转变形时记录下来的 S_e 、 S_p 、 S 的大小就可以定量、定性比较不同材料的使用性能。

用做刀具的材料——高速工具钢是一种组织十分不均匀的材料^[1,2,3] 塑性变形首先在晶界及相界等局部应力集中区,并且最后在该处出现微观裂纹导致剪切断裂,以上破坏过程都和外力做功有关,因此,用测定热扭转曲线不同阶段的外力所做的功比单纯用 τ 及 γ 评估高速钢使用性能更能正确、真实地反映实际情况,对一种高速钢刀具来说 S_e 代表它保持几何形状的能力,这种能力的大小基本上是由与基体的化学成份相关的原子键结合能力所决定的, S_p 面积大小代表它吸收弹塑性变形功的能力,这种能力大小对不同高速钢可以是由于它具有较大的 τ_{max} ,也可以是由于它具有较均匀的组织,较小的应力集中程度或者是由于它具有较强的局部松弛应力集中程度(γ_{max}) 所决定的。

扭转试验记录曲线是力矩 M 与剪变形 γ 之间的关系曲线,可以用两种方法对曲线 $M = f(\gamma)$ 进行定量和定性分析:

1) 图纸解析法:

$\triangle ABG$ 所包络的面积可以看作弹性变形的功,它可以按下式计算

$$W_e = BG * AG / 2$$

式中线段 AG、BG 是在等精度测量条件下直接由记录曲线上量度的数值。

曲线 BC 段是弹塑性变形区,BC 段的斜率可陡可缓,可将 BCDG 所围成的面积分割成若干三角形、梯形、矩形分别计算面积相加,或者直接由记录图纸计算出 W_p ,此面积的大小相当于弹塑性变形所消耗的功。

应当指出的是,由图纸解析计算出之 W_e 和 W_p 分别为弹性、弹塑性曲线与横坐标所包络

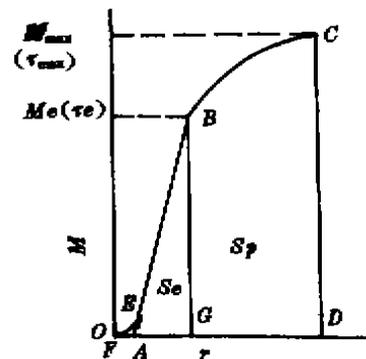


图 3 扭转力矩(M)
- 扭转变形(γ) 关系曲线

的面积(如图5),数值上不等于该材料扭转变形时之弹性变形功和弹塑性变形功,但它与变形功同比例变化,因此,可用其面积大小来表示其变形功的变化规律。

2) 数学解析法:

扭转变形的试样为圆形杆件,当试样全体屈服^[4]时:

$$M_s = 2\pi R^3 \tau_s / 3$$

即

$$\tau_s = 3M_s / 2\pi R^3 \quad (1)$$

试样工作带纯扭转剪应变为:

$$\gamma = R\theta = R\varphi / L = 2\pi Rn / L \quad (2)$$

式中 M_s : 试样进入屈服状态力矩;

R : 试样工作带半径;

L : 试样工作带长度;

τ_s : 屈服剪切抗力;

φ : 圆形杆件扭转变形时之相对扭转角;

θ : 单位扭转角;

γ : 剪变形;

n : 扭转圈数。

通过以上公式和记录曲线上得到的力矩、扭转圈数,就可以计算出扭转变形时比例极限所对应的剪切应力 τ 、剪变形 γ 、扭断瞬间最大剪切应力 τ_{max} 和最大剪变形 γ_{max} ,据此扭转弹性变形功 W_e 为:

$$W_e = \tau_s \gamma_s / 2 = 3M_s n / R^2 \cdot L \quad (3)$$

试样扭转时之弹塑性变形功 W_p 为:

$$W_p = \int_s \int \tau \gamma \quad (4)$$

式中 τ : 弹塑性变形区剪切应力;

γ : 弹塑性变形区剪切变形。

上式中 τ 值随变形程度的增加而增加,是典型的幂强化材料曲线,可以用下式计算之:

$$\tau = \tau_s \gamma^n \quad (5)$$

公式中 n 为强化系数,它是介于 $0 \sim 1$ 之间的正数,并随材料的种类及试验温度的不同而变化,当 $n = 0$ 时, $\tau = \tau_s$,代表理想塑性体模型,当 $n = 1$ 时代表理想弹性体模型,因为 γ 不会为零,而 $\gamma_{min} = \gamma_s$, $\gamma_{max} = \gamma_{max}$,所以 τ 值是由 $\tau_s - \tau_{max}$ 之间变化,所以公式(4)可以写成:

$$W_p = \int_s \int \tau \gamma = \int_s \int \tau_s \gamma^n d\gamma \quad (6)$$

式中 τ_s : 扭转弹性变形时的比例极限剪应力;

γ_s : 扭转弹性变形时的比例极限剪变形;

γ_{max} : 扭转断裂瞬时剪切变形值。

表 3 热扭曲线所包络面积形式图

总变形功	弹性变形功	弹塑性变形功	记录曲线形式	使用性能评估
$W_s = W'_s$	$W_e = W'_e$			<p>i 二者使用性能完全一致</p> <p>ii 二者虽然变形功 $W = W'$, $W_s = W'_s$, $W_e = W'_e$, 但二材料之使用性能不一致, 其中, $W_s = \tau_s \gamma_s$, $W'_s = \tau'_s \gamma'_s$, 当 $\tau_s > \tau'_s$ 时 $\gamma_s < \gamma'_s$; $\tau_s < \tau'_s$, $\gamma_s > \gamma'_s$, 高者较好, 因为刃具受载时几何变形小, 加工工件尺寸精确, 切削阻力小。</p>
$W = W'$				<p>i 对 W_s 小的材料, 刃具弹性变形大, 切削阻力大, 加工工件尺寸不易精确, 做车刀不合适, 但因总变形功相等, 因此出现微裂纹及断裂前吸收的变形功相同, 因 W_s 大者, 受载时虽然变形较大但出现微裂纹及断裂的危险性是相同的, 因此适合于做慢速周期性负载之刃具。</p> <p>ii 二者高温强度一致, 因此红硬性应当相似, 弹性变形功有差别, 也不会很大, 所以做车刃具应当同样适合, 但是, W_s 大者受冲击载荷时出现微裂纹的危险性小些。</p>
				<p>i 当 $W_s = W'_s$ 时, 二者保持其几何形状的能力是一致其加工件精度及切削阻力也一致, 但是 W_s 大的材料出现微裂纹及断裂危险性小, 抗周期性冲击载荷好, 更适合做铣削刀具。</p> <p>ii W_s 愈大的材料, 抗弹性变形能力愈强, 刃具变形小, 红硬性愈高, 总之 W_s 愈大者材料愈好, 使用性能愈高, $W_s > W'_s$, $W_e > W'_e$, 变形功为 W 的材料比变形功为 W' 的材料好, 如不能同时大, 则 W_s 大者适合切削刃具, W_e 大者适合做锯切刃具。</p>
$W_s = W'_s$	$W_e \neq W'_e$			
$W \neq W'$	$W_s \neq W'_s$	$W_e = W'_e$		
	$W_s \neq W'_s$	$W_e \neq W'_e$		

* $\triangle OAC$ 与 $\triangle OA'C'$ 面积代表弹性变形功 W_e, W'_e ; 四边形 $ABDC$ 与 $A'B'D'C'$ 代表塑性变形功 W_s, W'_s

4 不同高速钢热扭曲线的特性分析

不同高速钢热扭曲线 $M = f(\gamma)$ 或 $\tau = f(\gamma)$ 的形态变化各异,其包络面积的大小也不相等,二者综合考虑即可评定它们的使用性能。

1) 根据扭转曲线形态和所包络面积的大小,一般可归纳为表 3 所示的几种形式。

2) 从 M2A1 和 301 高速钢热扭变形数据(表 2) 可以看出:无论是 M2A1 或 301 高速钢,它们的弹性极限剪切应力和最大剪应力差别不大,用剪切应力来衡量二种高速钢的使用性能得不到说明问题的结果。但 M2A1 高速钢的总变形功、弹性变形功、弹塑性变形功均比 301 高速钢大,随热扭温度的升高差别愈趋明显,反映出 M2A1 高速钢比 301 高速钢做切削刀具更为恰当,这验证了 301 高速不适合做切削刀具是因该钢种合金成份的含量比 M2A1 高速钢低的缘故。

3) 热扭分析法它不仅能反映高速钢的高温强度和硬度,而且通过变形功的变化和比较可以说明刀具在切削过程中保持几何形状的能力及刀具出现微裂纹及断裂的危险性,更重要的是热扭分析法与刀具受载时其内部产生之应力状态一致,因此用热扭分析法比常规工具钢使用性能测试方法更能全面地、真实地反映工具钢的使用性能。

5 结束语

采用热扭分析法可以真实、全面地模拟工具钢受载条件下温升时的变形和破坏全过程。根据热扭分析法获得的工具钢受载时的变形大小、断口断裂形式,弹性变形功和弹塑性变形功之大小及其比值,可以准确地评估某种工具钢适用于制造何种刀具(锯、钻...)。该方法比单独或同时采用多种试验方法能更简单、更准确、更全面的反映不同工具钢的使用性能。

参 考 文 献

- 1 JOHN T. BERRY. Recent Developments in the processing of high speed steels. *Industrial Heating*. 1971(3):452~457
- 2 JOHN T. BERRY. Recent Developments in the processing of high Speed Steels. *Industrial Heating*. 1971(4):650~657
- 3 JOHN T. BERRY. Recent Developments in the processing of high speed steels. *Industrial heating*. 1971(5):866~872
- 4 Slater R A C. *Engineering phasticity theory and Application to Metal Forming Processes*. Macmillen Press L-I. 1977. 128~
- 5 罗安华等. 自制热扭转试验机-GX-6型线材扭转试验机改造. *理化检验*. 1984, (2):50
- 6 LM. 卡恰诺夫著. 周承调译. *塑性理论基础*. 北京:人民出版社出版,1983,132~134
- 7 刘源灿. *金属切削原理*. 上海:上海科学技术出版社. 1985, 10~21
- 8 吕立华等. 几种高速钢使用性能的热扭分析. *重庆大学学报*, 1992, 15(5):71~75